



Comment calculer l'impact environnemental des énergies renouvelables ?

Isabelle Blanc

► To cite this version:

Isabelle Blanc. Comment calculer l'impact environnemental des énergies renouvelables ?. ParisTech Review, 2015. hal-01248286

HAL Id: hal-01248286

<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01248286>

Submitted on 24 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Comment calculer l'impact environnemental des énergies renouvelables ?

Isabelle Blanc, professeur à MINES ParisTech

La transition énergétique et en particulier le bouquet électrique du futur fait l'objet de nombreux débats. Celui-ci a divers impacts environnementaux, aussi bien locaux que globaux. On pense notamment aux émissions directes de gaz à effet de serre causées par la production d'électricité et de chaleur à partir des énergies fossiles, qui ont représenté 25 % des émissions mondiales en 2010¹. Pour lutter contre le changement climatique tout en assurant un approvisionnement en énergie soutenable, l'Union Européenne s'est fixée l'objectif « 3 x 20 » à l'horizon 2020 : 20% de réduction des émissions de gaz à effet de serre par rapport au niveau de 1990, 20% d'économie d'énergie et une part de 20% d'énergie renouvelable (EnR) dans le mix énergétique européen. Elle s'est récemment fixée des objectifs encore plus ambitieux à l'horizon 2030 avec 40% de réduction des émissions de gaz à effet de serre, 27% d'économie d'énergie et une part de 27% d'énergies renouvelables. L'essor des renouvelables depuis le début des années 2000 devrait ainsi se poursuivre et s'amplifier dans les années à venir, modifier substantiellement le bouquet électrique du futur tout en limitant les impacts environnementaux associés. Il est donc indispensable d'étudier l'empreinte environnementale des différentes filières de production. En effet, si certains systèmes de production d'énergie renouvelable n'ont pas ou peu d'impacts durant leur phase de fonctionnement, ils ont néanmoins un effet sur l'environnement : en amont de la chaîne de production durant la phase de fabrication, et en aval pendant la fin de vie du système.

Par exemple, la dépendance des éoliennes au néodyme et au dysprosium, deux métaux de la famille des terres rares qui constituent les aimants permanents actuellement nécessaires pour l'alternateur, illustrent bien cette question sensible des ressources minérales : un déficit en dysprosium est prévisible à partir de 2020 compte tenu de l'augmentation de la demande actuelle. Autre exemple avec des technologies photovoltaïques très prometteuses comme le CIGS (cuivre, indium, gallium, sélénium) qui sont confrontées aux mêmes enjeux : on estime à 20 ans seulement le ratio « réserves sur production » de l'indium.

Pour cela, des outils existent comme l'analyse de cycle de vie, et les indicateurs qui en dérivent comme celui du temps de retour énergétique que nous présentons.

L'analyse du cycle de vie, un outil d'évaluation systémique et multicritère

L'analyse du cycle de vie (ACV) s'intéresse aux impacts environnementaux d'un produit ou d'un service sur l'ensemble de son cycle de vie. Elle repose sur l'agrégation des impacts environnementaux évalués à chaque étape depuis la fabrication des éléments qui composent le système jusqu'à la fin de vie du système lui-même. Par exemple, dans le cas de la production d'électricité par un panneau photovoltaïque installé en France, on s'intéressera à la fabrication en Asie de ses cellules polycristallines, au montage du

¹ « Chiffres clés du climat » édition 2015, [Rapport du SoES](#).

panneau en Allemagne et à son installation en France. La réalisation d'une ACV s'appuie sur des inventaires de polluants et de consommations de ressources. Cette approche systémique, du « berceau à la tombe », a fait l'objet de nombreux travaux de standardisation par l'ISO (normes 14 040 et 14 044) et par la Commission européenne. Elle est considérée comme un outil performant d'aide à la décision et d'optimisation environnementale.

Grâce à ce type d'analyse, les impacts directs et indirects causés par la production d'énergie peuvent être qualifiés et quantifiés selon différents indicateurs. Parmi les catégories d'impacts évalués à l'échelle de la planète figurent le potentiel de réchauffement climatique, la toxicité humaine, l'acidification, la consommation d'énergie primaire, mais aussi l'épuisement ou les pénuries prévisibles des ressources minérales et fossiles.

Un indicateur pertinent pour les renouvelables : le « temps de retour énergétique »

Le temps de retour énergétique est un indicateur particulièrement pertinent pour caractériser la performance environnementale des énergies renouvelables. Ces filières se caractérisent par un investissement énergétique important en phase de fabrication mais une faible consommation énergétique en phase d'utilisation. Le temps de retour énergétique détermine le temps nécessaire pour qu'une filière produise une quantité d'énergie primaire équivalente à celle qui a été nécessaire à sa fabrication. Il s'exprime en années et est calculé par le ratio de l'énergie consommée lors de la fabrication du système sur l'énergie produite par le système sur une année. Cette dernière est basée sur l'énergie primaire nécessaire pour produire l'énergie électrique équivalente du pays où le système renouvelable est installé. Il s'agit donc d'un calcul spécifique au bouquet électrique du pays concerné.

A titre illustratif, le tableau suivant propose le temps de retour énergétique pour deux panneaux solaires photovoltaïques de puissance de 3kW crête (technologie monocristalline et polycristalline) produits en Europe ou en Chine et installés en Europe. Cette précision géographique est essentielle, car ces temps de retour dépendent du contenu énergétique du kWh de la région d'installation. Dans le cas de l'Europe, le bouquet électrique moyen présente une valeur de 11,4 MJ/kWh d'énergie primaire par kWh d'électricité produite. Les temps de retour seraient supérieurs pour des installations identiques implantées dans des pays avec des bouquets énergétiques au contenu énergétique plus faible.

Les inventaires de cycle de vie de ces systèmes sont nécessaires pour le calcul des énergies de fabrication des panneaux photovoltaïques, en couvrant tous les sous-systèmes et le transport induit. Dans le cadre de cet exemple, les valeurs d'inventaire de cycle de vie de ces systèmes, fabriqués en Europe ou en Chine, sont issues de la base de données Ecoinvent v2.2 et sont représentatives d'une situation en 2011.

	Mono-cristallin	Mono-cristallin	Poly-cristallin	Poly-cristallin
Durée de vie de l'installation (années)	30	30	30	30

Lieu de fabrication	Europe	Chine	Europe	Chine
Lieu d'installation	Europe	Europe	Europe	Europe
Irradiation solaire moyenne annuelle	1700 kWh/m2	1700 kWh/m2	1700 kWh/m2	1700 kWh/m2
Temps de retour énergétique (années)	1,96	2,34	1,24	1,45

Tableau 1 : Temps de retour énergétique de panneaux photovoltaïques installés en Europe²

Les temps de retour énergétique sont de moins de deux années pour ces deux technologies lorsque les panneaux sont fabriqués en Europe et supérieurs de quelques mois lorsqu'ils sont fabriqués en Chine pour la technologie mono-cristalline. Cette approche « temps de retour » permet également de rendre compte d'un « rendement environnemental » en appliquant par exemple ce même raisonnement au poids carbone du cycle de vie des filières renouvelables : on parle alors de « temps de retour climatique ».

La comparaison des filières de production électrique par analyse de cycle de vie

La caractérisation des filières énergétiques par l'analyse de cycle de vie et les indicateurs de temps de retour qui en dérivent permet de comparer les filières et d'identifier des solutions d'amélioration. Elle permet aussi de nourrir le débat technique et sociétal que fait émerger l'essor des renouvelables dans les bouquets de production électrique.

C'est dans cette optique que le GIEC a conduit en 2011 une étude compilant des articles scientifiques sur l'indicateur de performance carbone³. Cet indicateur (en g de CO₂-eq / kWh) rapporte l'émission des gaz à effet de serre sur tout le cycle de vie de la filière, à la production d'électricité. L'étude visait à comparer les filières énergies fossiles (charbon, gaz et gaz naturel), la filière nucléaire et les énergies renouvelables. Cette compilation a permis de révéler l'ampleur de la distribution des résultats pour chacune des filières reflétant ainsi la très grande variabilité des conditions locales et des caractéristiques technologiques des systèmes dans les études disponibles. Il serait donc illusoire de vouloir caractériser chaque filière par une valeur unique et absolue de performance carbone. Cette interprétation trop simpliste offrirait une vision partielle du problème.

La plage de variation de l'indicateur de performance carbone souligne la meilleure performance des renouvelables. C'est un point important. Mais le carbone n'est qu'un indicateur parmi d'autres. Qu'en est-il des autres impacts environnementaux tels que l'épuisement des ressources naturelles ou la santé humaine ? L'étude ne se limitant qu'à l'indicateur de performance carbone mériterait d'être élargie à d'autres indicateurs.

Pour contribuer au débat sur la transition énergétique, ces évaluations environnementales par filière doivent être conduites à bon escient, c'est-à-dire en tenant

² D'après "Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems", Mariska de Wild-Scholten, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 119 (2013) 296-305.

³ Etude IPCC, Moomaw, W., P. Burgherr, G. Heath, M. Lenzen, J. Nyboer, A. Verbruggen, 2011: Annex II: Methodology. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs- Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

compte des spécificités technologiques et des spécificités locales. Ainsi menées, elles sont précieuses, car elles doivent permettre de nourrir la comparaison des bouquets énergétiques de production électrique, comme dans l'exemple qui suit : la Guadeloupe

Une analyse de cycle de vie à l'échelle d'un territoire

Le centre [Observation Impacts Energie](#) de MINES Paristech a mené une première analyse de cycle de vie à l'échelle d'un territoire⁴ pour évaluer l'impact environnemental de mix électriques prospectifs pour la Guadeloupe. Si l'objectif du Grenelle de l'Environnement est d'atteindre, en 2020, 23% de la production électrique sur l'ensemble du territoire national via les renouvelables, l'objectif pour les Départements et Régions d'Outre-Mer est de 50%, avec un objectif ultime de 100% et l'autosuffisance énergétique à l'horizon 2030.

Le choix de la Guadeloupe n'est pas indifférent. Cette île volcanique est un laboratoire pour la géothermie avec la centrale de Bouillante, première centrale géothermique productrice d'électricité en France, d'une puissance de 15 MW.

L'étude compare le scénario de référence du mix électrique en 2013 avec trois scénarios à l'horizon 2030 intégrant les objectifs du Grenelle de l'Environnement en matière de maîtrise des consommations et de développement des renouvelables. Elle repose sur 13 indicateurs d'impacts (changement climatique, toxicité humaine, diminution des ressources fossiles, acidification, eutrophisation...) permettant d'évaluer chacune des filières de production électrique dont six renouvelables : géothermie, biomasse (bagasse, canne fibre), éolien, photovoltaïque, hydraulique, recyclage des déchets et biogaz. La définition des quatre scénarios de développement du mix électrique guadeloupéen est basée sur les travaux réalisés par la Région Guadeloupe dans le cadre du PRERURE⁵:

. Le *scénario de base* utilisé comme référence représente l'état du mix électrique guadeloupéen en 2013, soit 83% d'énergies fossiles, importées pour la majeure partie. Il sert de comparaison avec les scénarios futurs et permet d'évaluer les impacts relatifs aux décisions de planification énergétique. Les renouvelables représentent 17% du mix électrique.

. Le *scénario tendanciel* suit les tendances observées lors des dernières années en termes de demande énergétique sans aucun effort particulier en faveur du développement des énergies renouvelables et du renforcement des actions de maîtrise de demande en énergie (MDE).

. Le *scénario Prérure* est le reflet d'un effort accentué en matière de maîtrise des consommations et de développement des filières renouvelables (à hauteur de 75% du mix électrique). Il est construit de façon à favoriser une diversification du mix énergétique. La géothermie se développe pour atteindre une puissance de 85 MW à l'horizon 2030.

. Le *scénario modéré*, établi spécifiquement dans le cadre du projet, est le reflet d'un effort modéré de la maîtrise des consommations d'une part, et du développement des renouvelables, d'autre part. La filière géothermie atteint une puissance de 45 MW.

⁴ Le projet de recherche EVALGTHDOM, mené en partenariat avec le BRGM avec le soutien de l'ADEME. [Voir la vidéo du projet en ligne « Accompagner la Guadeloupe vers l'autosuffisance énergétique ».](#)

⁵ Plan énergétique régional pluriannuel de prospection et d'exploitation des énergies renouvelables et d'utilisation rationnelle de l'énergie de la Guadeloupe.

Les phases du cycle de vie du système électrique guadeloupéen retenues comprennent la construction, la production et le transport de l'énergie. Les impacts liés à l'utilisation finale de l'électricité ne sont pas inclus, pas plus que le stockage de l'électricité ou les processus de recyclage et de fin de vie. Les inventaires des technologies de conversion d'énergie ont été réalisés dans les limites des détails disponibles propres à chaque technologie.

Les résultats de cette étude peuvent être illustrés à travers quatre impacts environnementaux représentatifs :

. le potentiel de réchauffement global, qui recense les gaz à effet de serre par kWh électrique produit, respecte quasiment un facteur 4, c'est-à-dire une réduction par quatre des gaz à effet de serre entre le scénario actuel et le scénario Prérure, grâce à la réduction très significative des énergies fossiles et l'abandon du charbon,

. l'acidification (aptitude des substances à créer et à relâcher des ions H^+ exprimée en équivalent dioxyde de soufre SO_2) peut avoir des impacts directs et indirects sur les écosystèmes (pluie acide et lessivage des sols). Cet impact suit le même schéma de réduction pour les scénarios étudiés que le potentiel de réchauffement global.

. l'écotoxicité, exprimée en CTUe (*Comparative Toxic Units*) correspond à une estimation de la fraction d'espèces potentiellement affectées, intégrée dans le temps et l'espace, par unité de masse de substance chimique émise. On observe une diminution de l'impact de la filière bagasse entre le scénario de base et le scénario tendanciel alors que sa part du mix de production électrique reste très similaire (respectivement 2,6% et 2,3%). Cette différence est imputable à l'hypothèse de diminution de l'utilisation de pesticide (arrêt de l'utilisation de diuron dans les trois scénarios prospectifs suite à son interdiction récente en Guadeloupe). Les impacts sont par contre plus importants dans les scénarios modéré et Prérure et sont la conséquence directe du développement de la filière canne et canne fibre pour ces deux scénarios prospectifs.

. l'eutrophisation marine, exprimée en kg d'azote, permet d'évaluer le potentiel d'eutrophisation du milieu marin. L'eutrophisation correspond à un processus d'accumulation de nutriments et peut entraîner des problèmes sur la santé du milieu touché (perte de diversité, dégradation). L'étude fait apparaître une forte diminution de cet impact dans les trois scénarios prospectifs. Elle est principalement liée aux efforts importants de limitation des émissions d'oxydes d'azote (NO_x) et d'ammonium (NH_4^+) des centrales thermiques qui sont équipées d'un dispositif de dénitrification des fumées censé réduire de 85% les émissions de NO_x .

Au-delà des résultats obtenus, cette étude d'analyse de cycle de vie sur le mix électrique d'un territoire participe au débat de la mise en œuvre de la transition énergétique : elle propose une première évaluation des impacts générés par des choix de filières sur ce mix, permet de révéler les filières ayant le plus d'impact selon les différents indicateurs sélectionnés, permet aussi de révéler les tendances contradictoires de ces choix sur les différents impacts, et contribue ainsi à peser sur les décisions de planification sur le territoire de la Guadeloupe.

En s'appuyant sur ces études d'ACV, on peut identifier les enjeux d'un *développement d'énergie durable* pour un territoire : l'optimisation des ressources locales

(renouvelables ou non) pour répondre à la demande en énergie, la maîtrise des flux d'importation de combustibles fossiles, de biomasse ou d'électricité, et bien sûr la minimisation des « fuites environnementales » à l'instar des fuites carbone⁶.

⁶ Commissariat général au Développement durable, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/206/204/comparaison-internationale-lempreinte-carbone-demande.html>

Code de champ modifié

Code de champ modifié